doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.004

高温背景下干湿复合气候异常时空分异与演变趋势

孙鸿盛[1,2]　李梦学[1,2]　黄晓杰[1,2]　李世嘉[1,2]　刘文丰[1,2]

(1. 中国农业大学水利与智能工程学院, 北京 100083; 2. 农业水资源高效利用全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在全球变暖背景下,气候异常正从单一维度的独立影响向多维度的复合压力演变,然而现有研究多聚焦于多种异常在同一时段的叠加(即同期复合),而忽视了气候异常在时间维度上的连续累积效应(即连续复合)。基于1960—2019 年多源观测与再分析数据,本研究构建了以高温为先导条件的分析框架,系统评估了全球陆地同期与连续复合气候异常(高温 - 干旱/湿润)的时空演变规律。研究结果表明,连续复合风险与同期复合风险表现出显著的空间重叠特征,即高频同期复合热点区往往也是连续复合发生热点区。全球超过 90% 陆地已遭受复合气候异常的影响,主导模态呈显著的纬度带双极格局,即北半球高纬度地区由暖湿复合主导,而热带及南半球地区由暖干复合主导。过去 60 年间复合气候异常总频数增加 5 ~ 7 倍,且演变趋势表现出显著的路径依赖特征,即同期暖干主导区呈干旱强化路径,而暖湿主导区呈湿润强化路径。本研究揭示了气候变化正表现为更具累积效应的长周期复合模式,强调了将连续复合气候异常纳入全球气候风险评估及适应性管理的紧迫性。

关键词: 气温变化; 复合气候异常; 同期复合; 连续复合; 时空分异

中图分类号: P467　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)22-0046-10　　**OSID**:

Spatiotemporal Differentiation and Evolutionary Trends of Compound Dry - Wet Climate Anomalies against High-temperature Background

Sun Hongsheng[1,2]　Li Mengxue[1,2]　Huang Xiaojie[1,2]　Li Shijia[1,2]　Liu Wenfeng[1,2]

(1. *College of Water Resources and Intelligence Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Under the background of global warming, climate anomalies are evolving from single-dimensional independent impacts toward multi-dimensional compound pressures. However, existing studies mostly focus on the superposition of multiple anomalies within the same period (i.e., concurrent compounding), while neglecting the continuous cumulative effect of climate anomalies along the temporal dimension (i.e., consecutive compounding). Based on multi-source observations and reanalysis data from 1960 to 2019, an analytical framework with high temperature as the preceding condition was constructed, and the spatiotemporal evolution of global concurrent and consecutive compound climate anomalies (high temperature - drought/wetness) over land was systematically evaluated. The results showed that consecutive compound risk and concurrent compound risk exhibited significant spatial overlap: hotspots of high-frequency concurrent compounds were often also hotspots of consecutive compounds. More than 90% of global land had been affected by compound climate anomalies. The dominant mode presented a pronounced bipolar pattern along latitude bands, with warm - wet compounds dominating in the high latitudes of the Northern Hemisphere, and warm - dry compounds dominating in the tropics and the Southern Hemisphere. Over the past 60 years, the total frequency of compound climate anomalies was increased by 5 ~ 7 times, and the evolution trend showed significant path-dependence: warm - dry dominant regions followed a drought-intensifying pathway, whereas warm - wet dominant regions followed a wetness-intensifying pathway. The research result revealed that climate change was manifesting as a longer-cycle compound mode with stronger cumulative effects, and highlighted the urgency of incorporating consecutive compound climate anomalies into global climate risk assessment and adaptive management.

Key words: temperature change; compound climate anomalies; concurrent compounding; sequential compounding; spatiotemporal differentiation

收稿日期: 2026 - 05 - 12　修回日期: 2026 - 08 - 12

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFC3213700)、国家自然科学基金项目(52239002、32361143871)和国家级大学生创新创业训练计划项目(202410019042)

作者简介: 孙鸿盛(2004—),男,硕士生,主要从事极端气候研究,E-mail: sunhs@cau.edu.cn

通信作者: 刘文丰(1988—),男,教授,主要从事气候变化与农业水文过程研究,E-mail: wenfeng.liu@cau.edu.cn

0　引言

全球气候变化是年度气候异常和极端气候增加的驱动因素之一[1-2]，温室气体排放的增加导致全球气温稳步上升[3-4]，放大了气候系统的不稳定性[5]。近年来，全球多地频繁经历热浪[6]，表明气候变化表现为异常年份的发生频次和强度不断增加[7-8]。在此背景下，越来越多的气候风险不再表现为孤立的单一气候异常，而是以多因子叠加或时序接续的复合形式出现，综合影响往往显著高于单一异常的线性累加，已成为当前气候风险评估的重要议题[9]。现有研究多聚焦于同期复合气候异常，例如夏季高温与干旱并发形成的复合干热事件(CDHW)，此类复合异常已在全球范围内频繁发生[9]，在中国大部分地区，热浪与干旱同期发生频率显著增加[10-11]，导致高温干旱复合风险不断加剧[12-13]。然而，气候风险的累积性不仅体现在同一时段内多种异常的叠加，还体现在异常影响沿时间维度的持续传递。由高温诱发并在次年延续的干湿异常同样具有显著影响，却往往在传统单灾种分析或仅关注同期并发的研究框架中被忽视，这类连续性复合气候异常不仅可能加剧农业减产和水资源短缺，还可能带来能源需求增加、生态系统退化及健康风险累积[8,14-15]。因此，同时关注同期与连续 2 类复合气候异常，对于理解气候变化背景下风险的长期变率及累积效应具有重要意义[3,16]。

在全球变暖背景下，高温作为一种强驱动因子引发了暖干与暖湿 2 种复合灾害路径，且均呈显著的协同增强趋势。最新研究表明高温显著加剧了暖干复合风险，高温显著放大骤发性干旱的严重程度与持续时间并加剧生态系统响应风险[17-18]，复合干热异常对植被生产力等生态功能的影响也呈增强趋势[19]。从更广泛的时空尺度看，全球多时间尺度上高温干旱发生频率与严重程度均有增加迹象[20]，日尺度复合干热事件也呈更频繁和更强的变化趋势[9]，在特定脆弱区域(如亚马逊等)，高温干旱过程可为未来更高温背景下水热风险提供窗口[21]；此外，复合干热风险上升使人群暴露风险的不平等更为显著，低收入及人口老龄化地区受影响尤为突出[22]。与此同时，暖湿复合事件也正成为新的风险热点，随着大气持水能力随温度升高而增加，低纬度地区热浪与暴雨的复合发生概率较中纬度高 56%[23]，并且在热浪发生情况下，降水复合风险呈更显著的变化信号[24]。暖干化主要威胁农业生产、水资源供应及森林火灾风险，其影响具有长期累积性[19,25]，SSP 多情景下中国主要粮食作物灌溉需求持续上升且可充分灌溉地区明显收窄[26]；而暖湿化不仅引发生理热胁迫，还常伴随暴雨引发城市内涝与洪水，对基础设施构成瞬时冲击[27-28]。已有研究表明，热带及中纬度干旱-半干旱地区往往是此类复合气候异常的高发区域，正面临着严峻的气候挑战[29-30]。总体而言，现有研究仍以同一年内并发型复合异常为主，对高温背景下干湿异常在时间维度上跨年度延续(连续复合)关注相对不足，尤其缺乏面向农业系统空间单元尺度的系统评估。

基于此，本研究构建一个统一的分析框架，以高温为先导条件，系统评估全球陆地降水异常(干旱或湿润)的响应特征。定义 2 类复合气候异常模态：①同期复合气候异常，即高温同年伴随发生的干旱或湿润异常。②连续复合气候异常，即高温次年伴随发生的干旱或湿润异常。基于 1960—2019 年多源全球观测与再分析数据，系统揭示这 2 类以高温为先导的复合气候异常时空演变规律。通过对比同期与连续尺度的风险格局，以期为理解气候变化带来的累积性压力提供见解。

1　研究方法

1.1　数据来源与处理

为在全球范围内系统评估复合气候异常的时空演变特征，综合利用 AgMERRA[31]、CRU[32] 和 TerraClimate[33] 3 套气候数据集，这些数据集提供了 1960—2019 年期间逐日或逐月降水量与气温等关键气候变量的时间序列信息，在数据来源、时空分辨率及应用场景上的互补性提高了结果稳健性。AgMERRA 是面向农业建模构建的气象驱动数据集，提供全球降水量、最高温度和最低温度等逐日记录，空间分辨率为 0.25°[31]，该数据集在再分析资料基础上结合观测信息进行了订正，已被广泛应用于农业气候影响与作物模拟研究[31,34]，能够较好支撑气候异常下农业环境响应的模拟分析[35]。CRU 是基于台站观测插值形成的月尺度网格化气候数据集，提供空间分辨率 0.5°的降水和气温记录[32]，在长期气候变化和大尺度气候背景研究中具有广泛应用[36]。TerraClimate 则是在 CRU 时间变率基础上结合高分辨率气候场构建的月尺度数据集，空间分辨率约为 5′(约 10 km)，能够更细致地刻画区域气候差异及水分条件变化[33]。因此，采用 3 套数据从农业应用背景、长期观测参照以及数据源差异对结果稳健性的影响等方面开展多源互证，而不是依赖单一数据源得出结论。

以年尺度为基础分析单位，将原始逐日或逐月数据统一聚合为年平均气温和年降水总量，为消除

不同数据集空间分辨率差异,以 CRU 的 0.5°分辨率为基准,对 AgMERRA 和 TerraClimate 统一重采样至 0.5°网格,然后采用面积加权方法将栅格数据进一步聚合至食品生产单元(Food production unit, FPU)尺度[37]。FPU 基于流域水文特征与行政边界将全球划分为 309 个子单元,具有较广的空间覆盖和较强的空间分辨能力,适合开展长期气候变化及农业风险分析。本文并未对 3 套数据进行格点层面的物理融合,而是在统一时空尺度后分别独立识别各类复合气候异常,并开展统计分析。仅展示单一数值或单一空间分布结果时,采用 3 套数据独立计算结果平均值,以反映多源数据下一致性信号,不同数据集间差异也用于表征结果的不确定性。

1.2 事件定义与识别框架

在年际尺度上识别的是异常年和异常状态,用于刻画高温背景下区域干湿条件相对常态的系统性偏离及其跨年度的延续影响,关注高温背景下干旱与湿润 2 类复合气候异常的时空分异及演变特征。考虑到全球气温变率具有显著的空间分异,北半球高纬度升温速率快于热带地区(图 1a,审图号:GS(2024)0650,图中空白部分为趋势不显著($p>0.05$)区域),采用相对阈值法定义高温年。以研究时段前 30 年(1960—1989 年)作为基准期,计算各 FPU 单元年平均气温的 70%(T_{70})、80%(T_{80})、90%(T_{90})分位数下高温年数量。敏感性分析显示(图 1b,展示了在选取不同阈值时,前 30 年与后 30 年高温年数量关系),在 T_{90} 阈值下,后 30 年(1990—2019 年)高温年数量是前 30 年的 6.5 倍,有效捕捉了变暖信号,因此采用 T_{90} 作为高温阈值,当某年平均气温 $T_i > T_{90}$ 时,该年定义为高温年。采用标准化降水指数(SPI)表征干湿状况(图 1c),SPI 通过对给定时间尺度上累积降水序列进行标准化处理,用于刻画降水相对于长期气候平均状态的偏离程度,具有明确的多时间尺度属性,已广泛用于不同时间尺度上干湿异常识别与干旱诊断[38-40]。基于 1960—2019 年降水序列拟合伽马分布,计算各区域各年 SPI,当 SPI 小于 -1.0 为干旱年,SPI 大于 1.0 为湿润年。SPI 正值表示降水相对于常年平均偏多,负值表示降水相对偏少,因此湿润/干旱指年际尺度的干湿异常状态,用于刻画气候背景偏离及其累积效应,不直接对应短历时的暴雨洪涝过程或基于日尺度定义的极端事件。

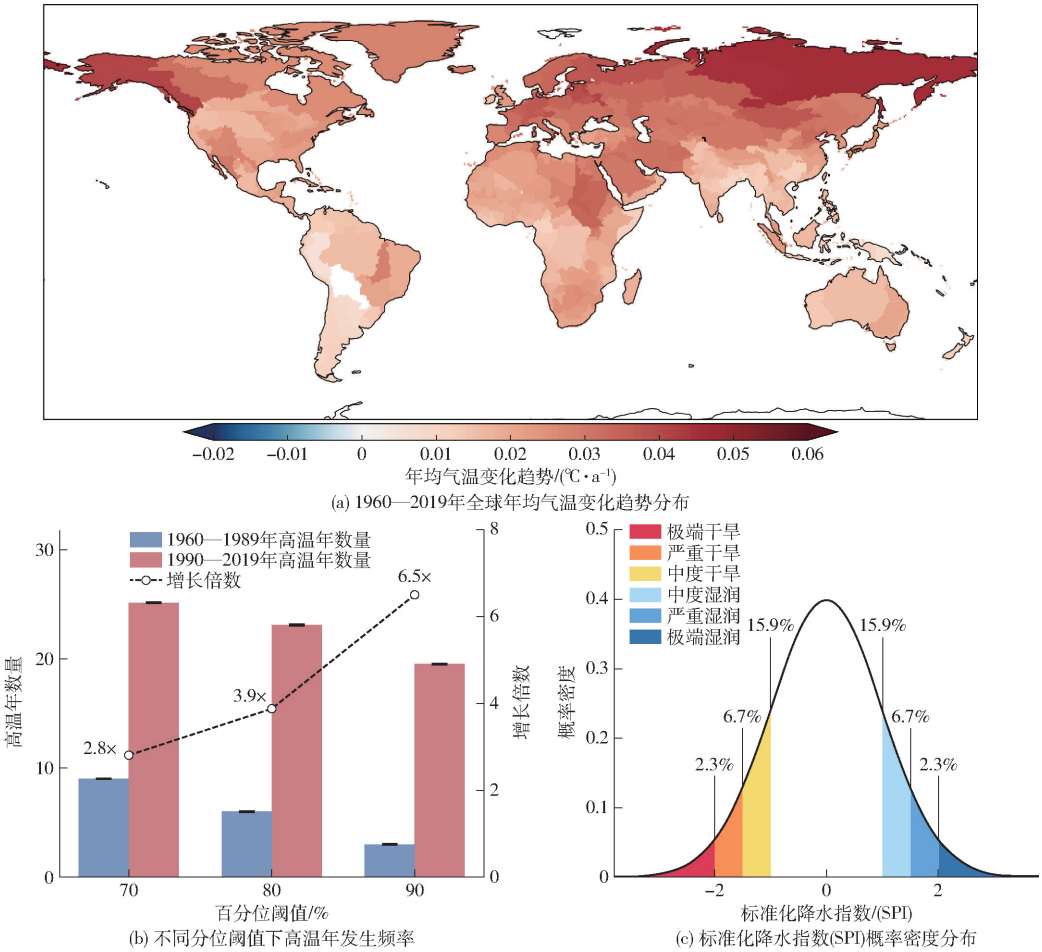


图 1 气温变化趋势及降水分布

Fig. 1 Trends in temperature changes and precipitation

提出以高温为先导条件的统一分析框架，识别 2 类复合模态：同期复合气候异常和连续复合气候异常。同期复合指高温与降水异常发生在同一年，若第 i 年满足 $T_i > T_{90}$ 且 $SPI_i < -1$，定义为同期暖干复合；若 $T_i > T_{90}$ 且 $SPI_i > 1$，定义为同期暖湿复合。连续复合指高温发生后，次年接续出现降水异常，若第 i 年满足 $T_i > T_{90}$ 且第 $i+1$ 年 $SPI_{i+1} < -1$，定义为连续暖干复合；若 $T_i > T_{90}$ 且 $SPI_{i+1} > 1$，定义为连续暖湿复合。

在此基础上，为揭示复合风险的空间分异规律，构建了主导类型分类指标。对于任意 FPU 单元，分别针对同期复合与连续复合模态统计研究期内发生暖干复合频次（N_{dry}）与暖湿复合频次（N_{wet}）：若 $N_{dry} > N_{wet}$，该区域定义为暖干主导型；若 $N_{wet} > N_{dry}$，该区域定义为暖湿主导型；若两者相等，定义为均衡型，这一分类有助于识别不同 FPU 单元在变暖背景下特定的水文风险演变路径。

1.3　统计方法

采用 Theil－Sen 斜率估计与 Mann－Kendall（M－K）非参数检验相结合方法，系统评估复合气候异常发生频数的长期演变趋势。其中，Theil－Sen 斜率通过计算所有数据对斜率的中位数量化趋势幅度，该方法对异常值表现出高度鲁棒性；M－K 检验则用于判定趋势统计显著性（显著性水平 $\alpha = 0.05$）。这一组合方法无需假设数据服从正态分布，因此被广泛应用于水文气象领域的非线性非平稳时间序列分析[41－42]。

为从全球尺度量化高温对水文过程的影响，采用核密度估计方法构建条件概率密度函数。具体而言，针对每一个 FPU 单元计算在高温背景下，同期或连续出现干旱（$SPI < -1$）、湿润（$SPI > 1$）以及总降水异常（干旱或湿润，即 $|SPI| > 1$）的条件概率 P。例如，$P(SPI < -1 | T > T_{90})$ 表示在气温超过 90% 阈值（高温年）条件下，发生标准化降水指数小于 －1（即干旱）的概率。随后利用高斯核函数对全球所有 FPU 的条件概率进行拟合，为消除高纬度网格与低纬度网格在地理面积上差异，在密度估计过程引入网格面积权重，最终生成加权概率密度曲线。

Spearman 秩次相关分析是一种非参数统计方法，通过变量的秩次而非原始值计算相关性，能够有效捕捉非线性单调关系，因此适用于分析气候异常条件下复杂依赖关系[43－44]。采用 Spearman 秩相关系数描述气温与降水在年尺度上统计联系，用于辅助识别高温背景下干旱与湿润异常在同期与连续 2 种情形中差异。对于同期复合气候异常，计算同一年气温与降水量间相关系数，以表征高温同年干旱或湿润异常的统计联系；对于连续复合气候异常，则计算第 i 年气温与第 $i+1$ 年降水量间滞后相关系数，用于分析高温背景下干湿异常在次年是否仍表现出延续性的统计特征。本文中 P－T（降水量–温度）相关性主要作为年尺度上的统计诊断指标，用于为解释不同区域同期与连续复合气候异常的差异提供参考，而不直接作为气温驱动降水变化的因果判据。

2　结果与分析

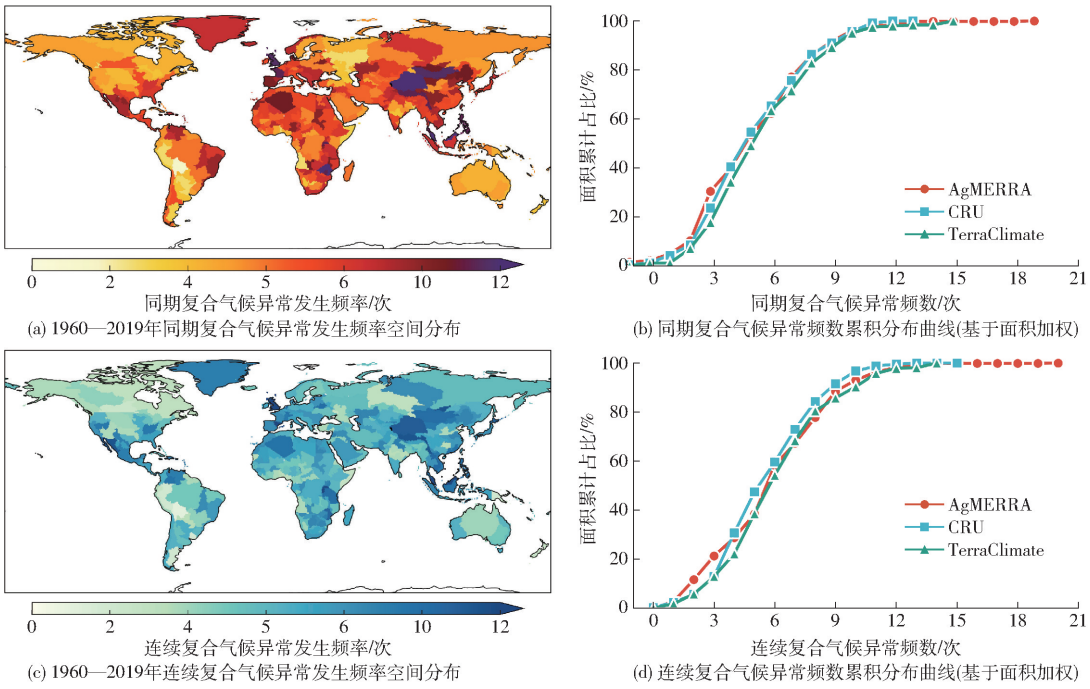
2.1　高温背景下复合气候异常发生概率与空间分异

2.1.1　全球复合气候异常频次分布格局

基于 1960—2019 年多源观测数据统计分析显示，2 类复合气候异常在全球范围内均呈显著的“热带高值、高纬低值”空间分异特征（图 2）。全球几乎所有陆地单元均经历过至少 1 次同期复合气候异常，高频热点区表现出明显的局部集聚效应，主要在热带及中纬度干旱–半干旱地带（如亚洲内陆），而高纬度寒冷地区及部分沿海地区发生频率相对较低（图 2a）。累积频率分析表明绝大多数区域（覆盖全球陆地面积的 88.1% ～89.9%）发生频次集中在 2～10 次之间；而频次超过 12 次的高风险区相对稀少，仅占全球陆地面积的不足 3%（图 2b）。连续复合气候异常的空间分布与同期复合表现出高度一致性，即高频同期复合热点区往往也是连续复合发生热点区（图 2c），88.7% ～94.5% 全球陆地在过去 60 年间经历了 2～10 次连续复合气候异常（图 2d）。

2.1.2　高温背景下降水异常条件概率特征

为量化高温对水文过程的非线性影响，进一步分析了在高温背景下，同期及连续出现干旱或湿润异常的条件概率密度分布（图 3，实线表示概率密度曲线，阴影表示分布范围）。在高温同年干旱的概率呈显著的右偏分布（图 3a），虽然大部分区域干旱概率集中较低水平（0.1～0.2），但长尾效应明显，部分区域面临极高的干旱并发风险。相比之下，高温同期发生湿润异常的概率分布更向低值收缩（图 3b），表明在全球平均尺度上，高温与干旱的耦合联系（暖干）显著强于高温与湿润的联系（暖湿）。而高温次年湿润异常的概率密度曲线峰值较干旱更为尖锐且突出（图 3e、3b），表明在高温次年湿润异常发生概率在全球更多区域表现出高度一致性。对比高温同年（图 3c）与次年（图 3f）总概率密度曲线，加权平均概率均稳定维持在 30% ～32%，意味着高温情况一旦出现，其引发水文波动的总风险水平恒定。

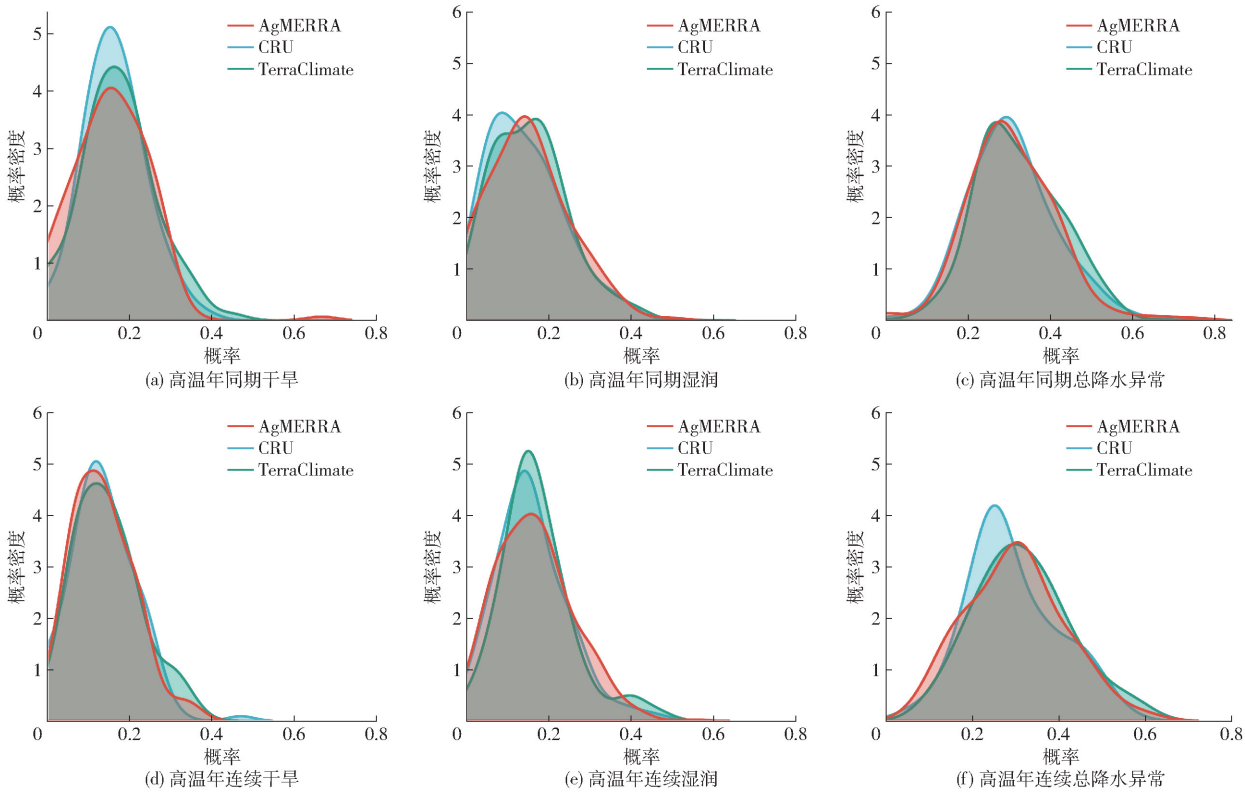


(a) 1960—2019年同期复合气候异常发生频率空间分布 (b) 同期复合气候异常频数累积分布曲线(基于面积加权)

(c) 1960—2019年连续复合气候异常发生频率空间分布 (d) 连续复合气候异常频数累积分布曲线(基于面积加权)

图 2 复合气候异常发生频率空间分布及其累积分布

Fig. 2 Spatial distribution and cumulative distribution of frequency of compound climate anomalies



(a) 高温年同期干旱 (b) 高温年同期湿润 (c) 高温年同期总降水异常

(d) 高温年连续干旱 (e) 高温年连续湿润 (f) 高温年连续总降水异常

图 3 高温背景下同期与连续降水异常概率密度分布

Fig. 3 Probability density distribution of concurrent and sequential precipitation anomalies under background of hot years

2.2 复合气候异常主导类型及其区域分异

在全球尺度上,同期复合气候异常主导类型呈显著的南北分异特征(图 4a、4c)。定义某区域主导类型取决于该区域在研究期内暖干复合与暖湿复合发生频次的相对高低,若暖湿频次高于暖干,即识别为暖湿主导区。基于此标准,暖湿主导区主要占据北半球中高纬度地区,数据显示在高纬度区域暖湿复合主导面积占比较高,欧亚大陆北部和北美北部亦表现为典型的暖湿特征,这一空间格局与该区域年尺度 P－T 相关系数空间分异特征具有较好一致性(图 4c)。而暖干主导区高度集中在热带及南半球大部分陆地,其中澳大利

亚、南美洲和非洲是全球最为核心的暖干频发区，这些区域在年尺度上表现出以负 P－T 相关为主的统计特征(图 4c)。

连续复合气候异常(图 4b、4d)从同期向连续尺度转换时，全球主导类型发生了由“干”向“湿”的显著大范围逆转(全球湿润主导面积占比由 39.1% 跃升至 56.5%)。澳大利亚是最为剧烈的“干转湿”热点区域，主导类型从同期的绝对“暖干”逆转为连续的“暖湿”，这一现象伴随着 P－T 相关系数符号反转(由 －0.33 转为 0.09)。此外，热带地区干旱主导范围也大幅收缩，呈向湿润化转变趋势，北美洲表现为暖湿特征的进一步强化，而南美洲和非洲虽然仍保持干旱主导地位，但强度和范围相较同期均显著减弱。

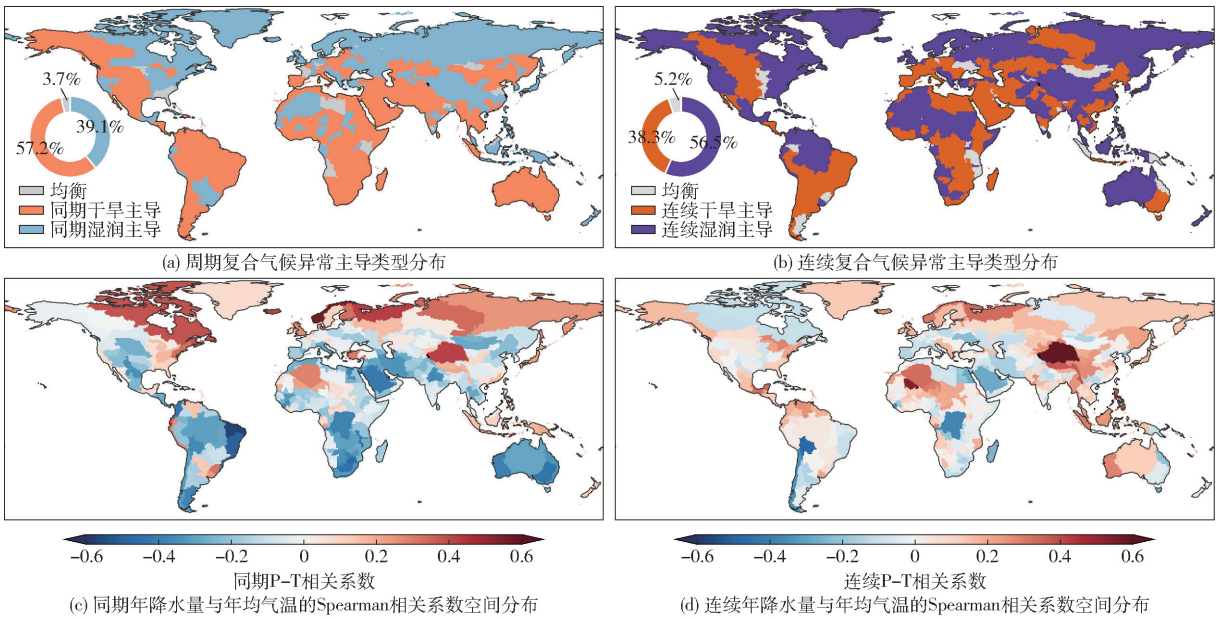


图 4　复合气候异常主导类型及年尺度降水量-气温相关性空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of dominant types of compound climate anomalies and annual precipitation－temperature correlations

小提琴图进一步量化 P－T 相关系数在不同主导类型区域统计分布特征(图 5，展示数据核密度分布及统计离散特征，其中内部黑色箱线范围代表四分位数，中心白点代表中位数)。同期复合气候异常在不同主导区表现明显分异特征，呈相反的相关系数分布模态(图 5a)，暖干主导区 P－T 相关系数分布显著偏负，加权均值为 －0.21，该区域内高达 91.8% 表现为负相关特性；而暖湿主导区相关系数分布显著偏正，加权均值为 0.18，正相关面积占比达 82.3%。连续复合气候异常中，强烈的双极分化显著减弱，分布形态趋于收敛(图 5b)。连续暖干主导区 P－T 相关系数虽然以负值为主(均值为 －0.08)，但相比同期大幅向 0 值收敛，且负相关面积占比降至 68.6%(同期为 91.8%)；相比之下，连续暖湿主导区依然保持了较强的正相关特征(均值为 0.14)，正相关面积占比维持在 86.2%。

2.3　复合气候异常长期演变

1960—2019 年长序列分析显示，各类复合气候异常发生频率均呈显著的爆发式增长态势(Mann－Kendall，p <0.01)(图 6，实线表示全球平均值，阴影区域表示不同数据集间的最大最小范围，虚线为线性拟合趋势线，数字标注为斜率)。无论是同期还是连续尺度，总频数在近 60 年间均激增 5～7 倍，其中连续总复合气候异常的增长更为迅猛。这种普遍的显著增长揭示了在变暖背景下，无论是干旱还是湿润异常，与高温复合的风险均在同步提升。在具体类型上，增长模式表现出明显的非对称性。在同期尺度上，暖湿复合气候异常增长速率(斜率)显著高于暖干，导致两者在近期的频数差距迅速缩小；而在连续尺度上，暖湿气候异常的绝对频数甚至已呈反超暖干趋势。

图 7(图中黑色虚线为线性拟合趋势线，误差棒表示不同数据集间标准差)为在不同同期复合气候异常主导背景下，连续复合气候异常频数的长期演变路径及其显著的区域分异特征。Mann－Kendall 趋势检验表明，所有类型的连续复合气候异常均呈显著增加趋势(p <0.01)，但增长模式表现出强烈的路径依赖性。在同期暖湿主导区，连续暖湿气候异常占据绝对主导地位，增长斜率(M－K Slope)高达 63.44，增长近 10 倍，而连续暖干气候异常增速仅为 28.33，不到前者一半(图 7a、7b)。相比之下，同期暖干主导区演变路径则更为复杂(图 7c、7d)，

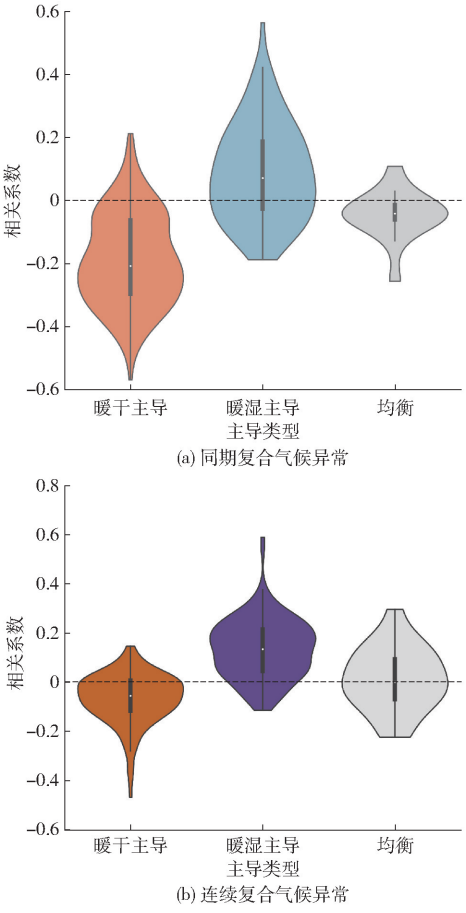


图 5 主导区内年尺度降水量-气温相关系数统计分布

Fig. 5 Statistical distribution of annual precipitation - temperature correlation coefficients in dominant regions

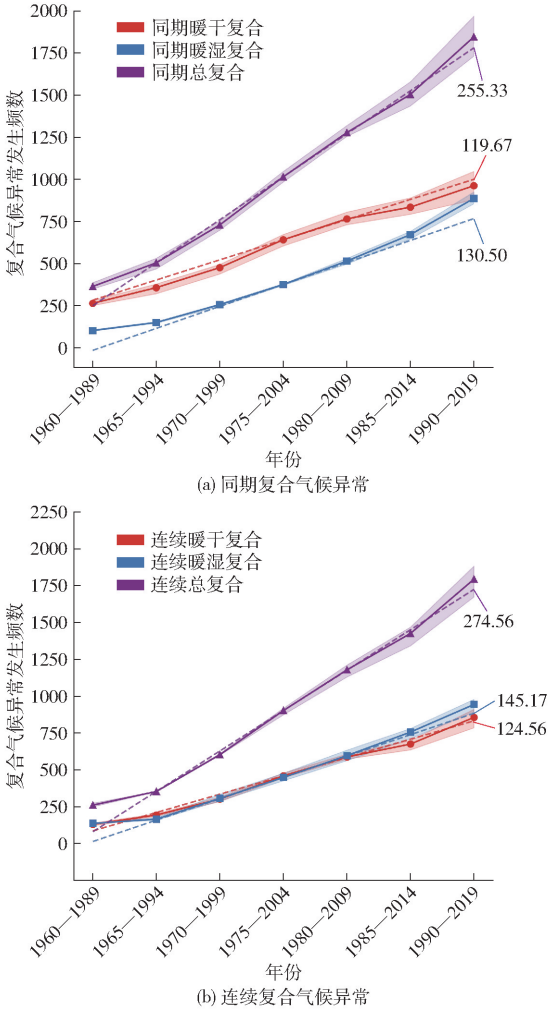


图 6 1960—2019 年复合气候异常频数时间变化趋势

Fig. 6 Temporal trends in frequency of compound climate anomalies from 1960 to 2019

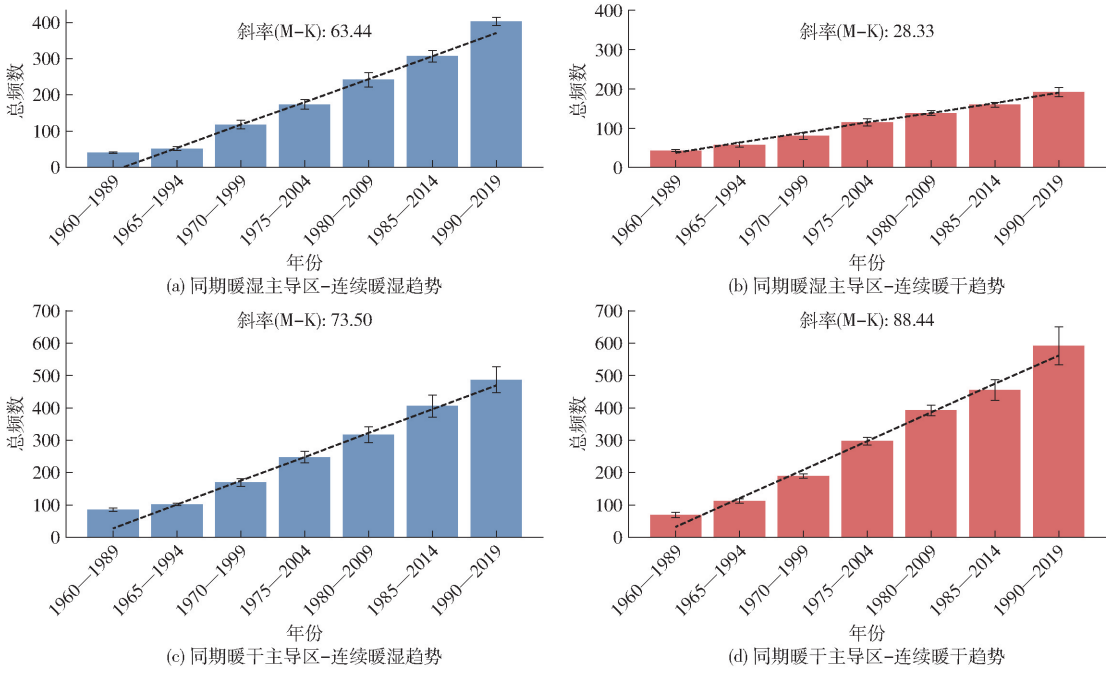
连续暖湿和连续暖干气候异常均显著增加,暖干复合增长斜率高达 88.44,高于暖湿的 73.50。

3 讨论

通过长序列观测数据得出连续复合气候异常与同期复合气候异常在空间分布上表现出显著的重叠特征,遭受高频同期气候冲击的区域,往往也是连续气候扰动叠加的关键区,热带及中纬度干旱-半干旱地区(如亚洲内陆)识别为全球复合气候的最核心热点。这一发现与关于气候脆弱性的研究结论高度一致,如非洲南部因脆弱的雨养农业系统,极易受到连续干旱与洪水的双重打击[45];而东南亚(如菲律宾、印度尼西亚)则面临频繁的热带风暴与灾后恢复力不足的矛盾[46]。随着复合气候异常发生频率上升[47],相关气候危机的严重程度将呈非线性放大,意味着单一灾害应对机制已不足以应对当前的气候现实。各国政府需优先关注这些由于频发打击导致恢复能力被反复削弱的地区,制定具有针对性的适应战略。

本研究核心创新是将连续发生机制纳入复合气候异常的定义范畴,传统复合定义多侧重于多变量在同一时刻的组合,而本研究强调灾害在多时段尺度的累积效应。发现从高温到同期干旱再到连续干旱这一灾害链在热带和副热带地区表现尤为显著,高温引发的深层土壤水分亏缺或植被受损往往难以在短期内修复,这种传递使得连续 2 年复合打击造成更为严重的后果。复合气候异常发生频率趋势分析结果(图 6、7)表明,以高温为先导的复合气候异常正在加速发生,意味着全球大部分陆地正在经历从单一热浪向长时效复合压力转变。这一发现要求灾害管理思维必须从应对突发性冲击转向应对持续性压力,如水资源管理不能仅依赖当年的降水预测,而需建立跨年度的水库调度与储备机制;农业育种也应从单纯抗热或抗旱,转向培育能耐受连续干旱生长季或旱涝急转的韧性作物品种。

选用 AgMERRA、CRU 及 TerraClimate 等多源再分析与观察数据集,并设定严格的相对阈值(如 90% 高温分位数)进行交叉验证,以有效量化数据源带来的不确定性,确保统计结果的准确性。在空间尺度上,选取食品生产单元(FPUs)作为基本分析



(a) 同期暖湿主导区-连续暖湿趋势　(b) 同期暖湿主导区-连续暖干趋势

(c) 同期暖干主导区-连续暖湿趋势　(d) 同期暖干主导区-连续暖干趋势

图 7　基于同期主导状态的连续复合气候异常频数变化趋势

Fig. 7　Trends in conditional occurrence frequency of sequential compound climate anomalies based on concurrent dominant conditions

单元,并将时间跨度延长至 60 年(涵盖 2 个标准气候态时段),旨在使研究成果能直接服务于粮食安全评估。考虑到作物产量对气候波动的响应往往具有累积性和滞后性[48-49],年尺度分析能更有效地捕捉长期气候趋势对农业生产系统的潜在威胁。此外使用包含长期趋势的实际温度数据而非去趋势数据,能更真实地反映全球变暖背景下农业系统面临的实际热胁迫水平。然而年尺度分析不可避免地存在时空平滑效应,如冬季寒冷与夏季高温在年平均中可能相互抵消[50],导致对某些短时极端事件(如骤旱、寒潮)的捕捉能力不足。尽管本研究的重点在于高温背景下整体水文异常而非短时极端值,但未来工作仍需进一步将时间尺度细化至月或季度,以探索更精细的复合气候异常动力学机制,为气候异常精准预测与防灾减灾提供更坚实科学依据。

4　结论

(1)全球超过 90% 陆地已受到复合气候异常的影响,热带及中纬度干旱-半干旱地区(如亚洲内陆)被识别为同期与连续复合气候异常的热点区,面临着严峻的气候打击风险。

(2)同期复合气候异常主导模式呈显著的“高纬暖湿、低纬暖干”南北分异格局,与区域降水量-气温(P-T)耦合机制高度一致。然而从同期向连续尺度转换时,全球部分区域发生了显著的“干旱转湿润”类型逆转,最典型的是澳大利亚区域。

(3)过去 60 年间,各类复合气候异常发生频数增加 5 ~ 7 倍,连续复合气候异常的增速显著快于同期复合气候异常。在演变趋势上,表现出显著的极化特征:暖干主导区面临干旱化加剧风险,而暖湿主导区则呈湿润化增强趋势。

(4)复合气候异常的加速增长已成为全球气候变化不可忽视的新常态,相比于单一气候异常,这种复合的灾害模式对人类社会和生态系统构成了更为严峻的挑战。复合气候异常通过揭示时空演变规律与潜在物理机制,为高风险地区制定针对性的气候适应与防灾减灾战略提供了科学支撑。

参　考　文　献

[1] Li S, Wang B, Liu D L, et al. The contribution of climate drivers to compound drought and extreme temperature events increased in recent decades[J]. Weather and Climate Extremes, 2025, 49: 100793.

[2] Zantout K, Balkovic J, Billing M, et al. Shifting dominant periods in extreme climate impacts under global warming[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 9746.

[3] Di Capua G, Rahmstorf S. Extreme weather in a changing climate[J]. Environmental Research Letters, 2023, 18(10): 102001.

[4] Montzka S A, Dlugokencky E J, Butler J H. Non-CO_2 greenhouse gases and climate change[J]. Nature, 2011, 476(7358):

43 – 50.
[5] Ou Y, Roney C, Alsalam J, et al. Deep mitigation of CO_2 and non-CO_2 greenhouse gases toward 1.5℃ and 2℃ futures[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 6245.
[6] Robinson A, Lehmann J, Barriopedro D, et al. Increasing heat and rainfall extremes now far outside the historical climate[J]. NPJ Climate and Atmospheric Science, 2021, 4(1): 45.
[7] Wu H, Su X, Singh V P. Increasing risks of future compound climate extremes with warming over global land masses[J]. Earth's Future, 2023, 11(9): e2022EF003466.
[8] Aghakouchak A, Chiang F, Huning L S, et al. Climate extremes and compound hazards in a warming world[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2020, 48(1): 519 – 548.
[9] Jiang L, Zhang J, Bai L, et al. Increased frequency and severity of global compound dry and heat wave events in a daily scale [J]. Journal of Hydrology, 2025, 654: 132857.
[10] 熊少堂, 赵铜铁钢, 郭成超, 等. 我国各大流域复合高温干旱事件变化趋势与归因分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(1): 83 – 96.
Xiong Shaotang, Zhao Tongtiegang, Guo Chengchao, et al. Evaluation and attribution of trends in compound dry-hot events for major river basins in China[J]. Scientia Sinica Terrae, 2024, 54(1): 83 – 96. (in Chinese)
[11] 舒章康, 李文鑫, 张建云, 等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 116 – 125.
Shu Zhangkang, Li Wenxin, Zhang Jianyun, et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 116 – 125. (in Chinese)
[12] 廖国清, 朱烨, 吴光东, 等. 中国近 60 年干旱热浪演变趋势及并发特征分析[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 169 – 176.
Liao Guoqing, Zhu Ye, Wu Guangdong, et al. Evolution characteristics and concurrences of droughts and heat waves in China over the past six decades[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(2): 169 – 176. (in Chinese)
[13] 武新英, 郝增超, 张璇, 等. 中国夏季复合高温干旱分布及变异趋势[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(12): 90 – 98.
Wu Xinying, Hao Zengchao, Zhang Xuan, et al. Distribution and trend of compound hot and dry events during summer in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(12): 90 – 98. (in Chinese)
[14] Du H, Donat M G, Zong S, et al. Extreme precipitation on consecutive days occurs more often in a warming climate[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(4): 1130 – 1145.
[15] You J, Wang S, Zhang B, et al. Growing threats from swings between hot and wet extremes in a warmer world[J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(14): e2023GL104075.
[16] Lubchenco J, Karl T R. Predicting and managing extreme weather events[J]. Physics Today, 2012, 65(3): 31 – 37.
[17] Gu L, Schumacher D L, Fischer E M, et al. Flash drought impacts on global ecosystems amplified by extreme heat[J]. Nature Geoscience, 2025, 18(8): 709 – 715.
[18] Hamed R. Heat extremes amplify flash drought impacts on ecosystems[J]. Nature Geoscience, 2025, 18(8): 686 – 687.
[19] Liang Y, Wang J, Hao Z, et al. Anthropogenically-driven escalating impact of soil-based compound dry-hot extremes on vegetation productivity[J]. Nature Communications, 2026, 17(1): 2303.
[20] Zhang Y, Hao Z, Chen Y, et al. Increases in global hot droughts across multiple timescales[J]. Science China Earth Sciences, 2025, 68(10): 3189 – 3199.
[21] Chambers J Q, Nogueira L A J, Pastorello G, et al. Hot droughts in the Amazon provide a window to a future hypertropical climate[J]. Nature, 2026, 649(8099): 1190 – 1196.
[22] Guo J, Wang F, Wen Y, et al. Rising compound hot-dry extremes engendering more inequality in human exposure risks[J]. NPJ Natural Hazards, 2025, 2(1): 66.
[23] Tang Y, Luo M, Wu S, et al. Increasing synchrony of extreme heat and precipitation events under climate warming[J]. Geophysical Research Letters, 2025, 52(8): e2024GL113021.
[24] Liu J, Chen J, Zhang X J, et al. Anthropogenic changes of compound extreme precipitation preconditioned by heatwaves have emerged from the internal climate variability in China[J]. Earth's Future, 2025, 13(9): e2024EF005162.
[25] 祝亚丽, 刘洋, 孔祥慧, 等. 中国高温、干旱及其复合事件的研究进展和展望[J]. 大气科学学报, 2025, 48(1): 26 – 36.
Zhu Yali, Liu Yang, Kong Xianghui, et al. Research progress and prospect on the drought, heatwave, and compound drought and heatwave events in China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2025, 48(1): 26 – 36. (in Chinese)
[26] 王玉宝,邢欣,孙博宁,等.多气候情景下中国主要粮食作物灌溉需求与发展潜力[J]. 农业机械学报, 2026, 57(12): 310 – 319.
Wang Yubao, Xing Xin, Sun Boning, et al. Irrigation demand and development potential of major food crops in China under multi-climate scenarios[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(12): 310 – 319. (in Chinese)
[27] He W, Chen H. More extreme-heat occurrences related to humidity in China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2023, 16(5): 100391.
[28] 张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(14): 1814 – 1828.
Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Pengling, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(14): 1814 – 1828. (in Chinese)

[29] You J, Wang S. Higher probability of occurrence of hotter and shorter heat waves followed by heavy rainfall[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(17): e2021GL094831.
[30] Gu L, Chen J, Yin J, et al. Global increases in compound flood-hot extreme hazards under climate warming[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(8): e2022GL097726.
[31] Ruane A C, Goldberg R, Chryssanthacopoulos J. Climate forcing datasets for agricultural modeling: merged products for gap-filling and historical climate series estimation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 200: 233 – 248.
[32] Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset [J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 109.
[33] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958—2015[J]. Scientific Data, 2018, 5(1): 170191.
[34] Araghi A, Martinez C J, Olesen J E. Evaluation of multiple gridded solar radiation data for crop modeling[J]. European Journal of Agronomy, 2022, 133: 126419.
[35] Liu W, Li M, Huang Y, et al. Mitigating nitrogen losses with almost no crop yield penalty during extremely wet years[J]. Science Advances, 2024, 10(9): eadi9325.
[36] Wu H, Su X, Singh V P. Blended dry and hot events index for monitoring dry-hot events over global land areas[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(24): e2021GL096181.
[37] Xu Y, Knudby A, Ho H C, et al. Warming over the Tibetan Plateau in the last 55 years based on area-weighted average temperature[J]. Regional Environmental Change, 2017, 17(8): 2339 – 2347.
[38] Vicente-Serrano S M, Van Der Schrier G, Beguería S, et al. Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 42 – 54.
[39] Wu J, Chen X, Yao H, et al. Multi-timescale assessment of propagation thresholds from meteorological to hydrological drought [J]. Science of the Total Environment, 2021, 765: 144232.
[40] Sabut A, Mishra A. A century of drought research (1900—2023): scientific developments, methodological innovations, and emerging frontiers[J]. Water Resources Research, 2026, 62(1): e2025WR041987.
[41] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 718 – 730.
Gu Xihui, Zhang Qiang, Kong Dongdong. Spatiotemporal patterns of extreme precipitation with their responses to summer temperature[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 718 – 730. (in Chinese)
[42] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961—2007 年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 291 – 299.
Li Zhi, Zheng Fenli, Liu Wenzhao. Analyzing the spatial-temporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 291 – 299. (in Chinese)
[43] Zhang S, Li J, Zhang T, et al. Response of vegetation to SPI and driving factors in Chinese mainland[J]. Agricultural Water Management, 2024, 291: 108625.
[44] Cui S, Gao J, Sun F, et al. Comparison of vegetation responses to diverse water sources in the Yangtze River Basin: insights from meteorological, hydrological, and agricultural drought[J]. Ecological Indicators, 2025, 175: 113524.
[45] Akpa A F. The effects of climate extreme events on selected food crop yields in Sub-Saharan Africa[J]. Heliyon, 2024, 10(9): e30796.
[46] Try S, Qin X. Evaluation of future changes in climate extremes over Southeast Asia using downscaled CMIP6 GCM projections [J]. Water, 2024, 16(15): 2207.
[47] Cowan T, Undorf S, Hegerl G C, et al. Present-day greenhouse gases could cause more frequent and longer Dust Bowl heatwaves[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(6): 505 – 510.
[48] Roubicek A J, Vanderwal J, Beaumont L J, et al. Does the choice of climate baseline matter in ecological niche modelling? [J]. Ecological Modelling, 2010, 221(19): 2280 – 2286.
[49] Schreck C J, Klotzbach P J, Bell M M. Optimal climate normals for North Atlantic hurricane activity[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(9): e2021GL092864.
[50] Twardosz R, Kossowska-Cezak U. Exceptionally cold and mild winters in Europe (1951—2010)[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 125(1 – 2): 399 – 411.